

王颖, 张镭, 胡菊, 等. WRF 模式对山谷城市边界层模拟能力的检验及地面气象特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1397—1407

WRF 模式对山谷城市边界层模拟能力的 检验及地面气象特征分析

王 颖, 张 镭*, 胡 菊, 张 燕

(兰州大学 大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用先进的 WRF 中尺度模式中 3 种边界层参数化方案(YSU、MYJ 和 ACM2), 模拟了 2005 年 1 月 25~28 日兰州市冬季地面温度和风速的变化, 并与同期系留探空和自动气象站的实测资料进行了对比分析。结果表明: 对兰州冬季大气边界层地面温度日变化的模拟, 局地闭合的 MYJ 方案优于非局地闭合的 YSU 和 ACM2 方案; 3 种方案模拟的夜间位温廓线较好, 白天的较差; 在边界层低层, 考虑局地和非局地闭合的 ACM2 方案模拟的位温廓线与观测值比较一致; 在边界层上部, 局地闭合的 MYJ 方案则更适合于描述大气湍流对位温垂直分布的影响; 3 种边界层参数化方案模拟的兰州地区冬季温度场空间分布特征相似, 但 MYJ 方案模拟的夜间温度低于 YSU 和 ACM2 方案, 白天则高于 YSU 和 ACM2 方案。

关键词: 兰州; WRF 模式; 边界层参数化; 温度场; 风场; 复杂地形

文章编号: 1000-0534(2010)06-1397-11 **中图分类号:** P435 **文献标识码:** A

1 引言

大气边界层位于受地面影响强烈的对流层底部, 是地气相互作用和大气污染的主要发生地。湍流运动是其主要特征, 大气边界层通过地表强迫和湍流输送等影响地面和大气之间的动量、热量交换, 边界层内的垂直混合决定了污染物的地面浓度, 因此边界层参数化方案不仅是气象模式的重要组成部分, 也是空气污染模式的重要基础^[1]。在中尺度数值模式研究中, 发展出了多种边界层物理过程参数化方案, 不同的边界层参数化方案对地面气象场和污染物扩散的影响, 倍受科研工作者的关注。

目前国内应用比较广泛的中尺度数值模式有 RAMS、MM5 和 WRF 等。很多学者对 MM5 不同边界层参数化方案的模拟效果进行了研究, 主要集中在对暴雨和台风等天气过程的模拟^[2-7]、与污染模式耦合的空气质量模拟^[8-10], 以及低层温度场和风场的研究^[11-12]。根据下垫面特征、模式分辨率和模拟对象的不同, 不同参数化方案模拟效果差别

很大, 但多数研究者认为在不稳定条件下, 非局地闭合方案的模拟效果优于局地闭合方案^[13]。针对 WRF 不同边界层参数化方案敏感性试验, 也获得了很大的进展。例如 Zhang et al.^[14] 通过对 2006 年 3 月墨西哥 3 km 分辨率的温度、相对湿度和风速的模拟, 发现各方案模拟的白天风速普遍偏高; YSU 方案对白天地面温度的模拟效果较好, 夜间则较差; MYJ 方案对夜间温度模拟效果优于白天。Hu et al.^[15] 通过 2005 年夏季美国中南部地区的模拟, 发现局地闭合的 MYJ 方案偏差较大; YSU 和 ACM2 方案模拟的白天低层大气温度和湿度优于局地闭合的 MYJ 方案。Miglietta et al.^[16] 利用 MYJ 和 YSU 两种方案模拟了地中海东部克利特岛 2008 年 5 月 14 日连续 24 h 的地面风场特征, 与合成孔径雷达观测对比后认为 YSU 方案的模拟效果较好。国内对 WRF 不同边界层参数化方案敏感性试验, 主要集中在对主要天气过程的影响, 而对不同参数化方案如何影响边界层风温场的研究则相对较少, 陈炯等^[17] 利用 WRF 的 2 种边界层参数化方

收稿日期: 2010-09-06; 改回日期: 2010-11-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40830957); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项(860033)共同资助

作者简介: 王颖(1975—), 女, 吉林人, 副教授, 主要从事大气边界层和空气污染模拟研究。E-mail: yingwang@lzu.edu.cn

* 通信作者: 张镭。E-mail: zhanglei@lzu.edu.cn

案和 3 种陆面参数化方案，模拟了北京地区夏季边界层的日变化及地面风场、温度场，并与自动气象站观测资料对比分析，认为 MYJ 方案描述的边界层结果较 YSU 方案合理。由于大气边界层与下垫面联系密切，对于复杂下垫面边界层特征的研究一直是大气边界层研究领域的难点，复杂下垫面对大气低层的各种热力和动力效应影响边界层内物质和能量的输送，从而改变边界层温度场和风场的水平和垂直分布特征。目前对 WRF 不同边界层参数化方案在复杂下垫面条件下的模拟能力认识有限。

兰州市大气边界层风场、温度场与污染物的扩散具有密切的关系^[18-22]。本文利用 WRF V3.0 的 3 种不同边界层参数化方案，对地面风和温度日变化、风温廓线进行模拟，并与自动气象站和低空探测资料对比分析，讨论不同参数化方案模拟复杂下垫面边界层气象场的能力，对提高天气模拟、预报水平和揭示城市空气污染特征具有重要意义。

2 资料选取和模拟参数介绍

2.1 资料选取

本文选取 2005 年 1 月 20 日~2 月 3 日在兰州

市西固区进行的大气边界层观测试验的观测资料，观测地点位于兰州市第二自来水厂(下称西固二水厂)。

(1) 自动气象站(CAMPBELL 公司、4 要素、美国): 地面温度、湿度、风向和风速 24 h 连续观测; 观测精度: 温度 0.2℃、湿度 4%、风向 5°及风速 0.3 m·s⁻¹。

(2) 系留探空系统(AIR, TS-2A, 美国): 低空温度、气压、风向和风速观测, 每天 8 次(02:00, 05:00, 08:00, 11:00, 14:00, 17:00, 20:00, 23:00(北京时, 下同), 观测最大高度 400~800 m; 观测精度: 温度 0.2℃、气压 1.0 hPa、风向 5.0°及风速 0.25 m·s⁻¹。

为了检验不同 PBL 参数化方案对兰州地区地面气象场的模拟效果, 更好地反映复杂下垫面不同地点的地面气象要素特征, 我们还利用 2005 年 1 月 25 日 00:00~28 日 00:00 期间兰州市地面自动站观测资料将不同 PBL 参数化方案的模拟结果进行了对比分析, 以检验 WRF 不同边界层参数化方案的模拟效果。

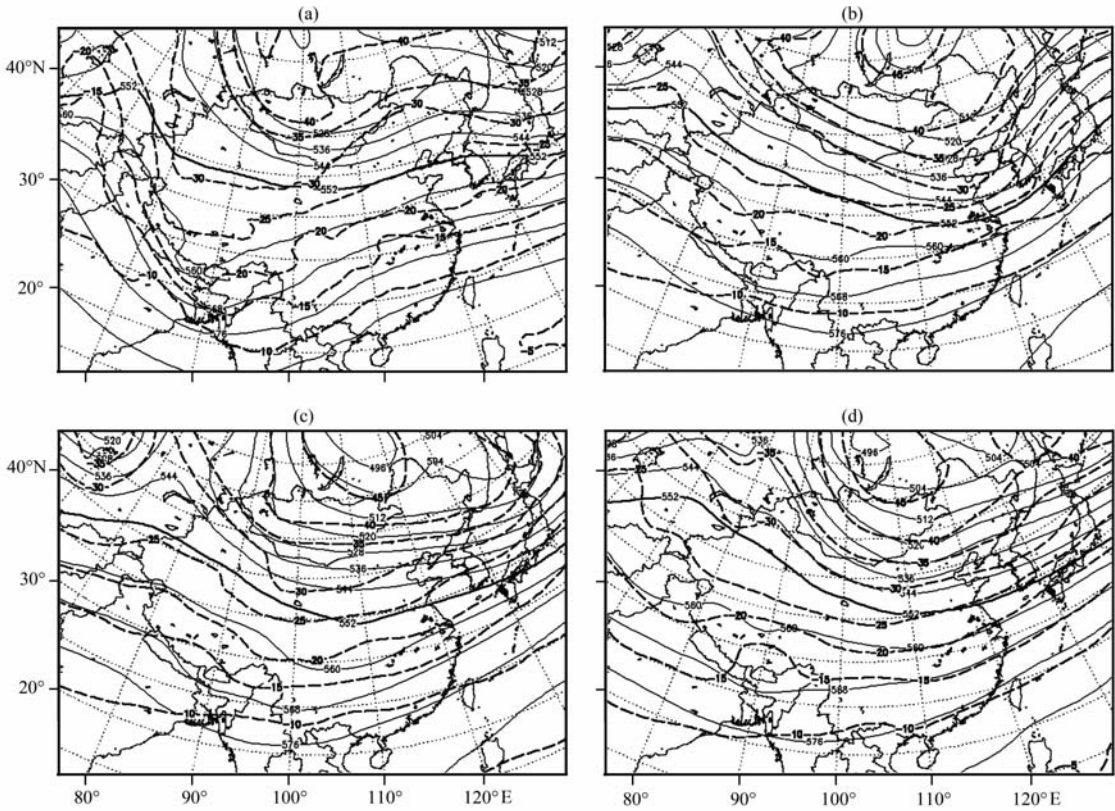


图 1 2005 年 1 月试验期间各月 20:00 500 hPa 天气形势

(a) 23 日, (b) 25 日, (c) 26 日, (d) 27 日

Fig. 1 500 hPa synoptic patterns at 20:00 on 23 (a), 25 (b), 26 (c) and 27 (d) January 2005

2.2 试验期间天气形势

从 500 hPa 形势可知, 2005 年 1 月 20~28 日观测期间, 兰州地区受西北气流控制, 天气以晴为主。1 月 20 日, 兰州上空有冷空气过程, 但系统偏北且较弱, 对兰州地区影响轻微(图略); 23~24 日, 北部西伯利亚冷空气(冷槽)东移, 南部青藏高原低槽形成。受南北两槽的影响, 兰州地区出现弱降水, 温度变化幅度不大(图 1a); 25~28 日, 兰州地区受稳定的西风气流控制(图 1b~d), 天气晴好。

2.3 WRF 模拟设计

WRF 模拟区域中心位于 103.82°E, 36.05°N, 模式采用 η 地形追随坐标系, 垂直分 35 层, 水平三重网格嵌套, 其中第一模式域为 77×53, 格距为 25 km; 第二模式域为 131×91, 格距为 5 km; 第三模式域为 91×46, 格距为 1 km。采用 NCEP 全球 30 s 地形资料和 NCEP 再分析资料(每 6 h 输入一次)。模拟时段为 2005 年 1 月 25~28 日, 每隔 1 h 输出一次模拟结果。

物理过程参数化方案: 微物理过程选取第 6 标准的 WSM 方案; 积云对流参数化方案在第一、二重区域选取 Kain—Fritsch (new Eta)方案, 第三重模式域由于分辨率较高(1 km)而没有启动积云对流参数化方案; 辐射参数化方案选取 RRTM 短波辐射方案和 Dudhia 长波辐射方案; 陆面过程参数化采用热交换方案。敏感性试验时, 物理过程处理相同, 但边界层参数化方案分别采用 YSU、MYJ 和 ACM2 3 种 PBL 参数化方案。

2.4 边界层参数化方案

WRF V3.0 中有 3 种边界层参数化方案, 即 YSU、MYJ 和 ACM2 方案。下面从闭合方法、湍流交换过程和边界层高度等方面, 介绍 3 种边界层参数方案的主要区别(表 1)及特点。

(1) YSU 方案^[23]

YSU 方案是 Medium_Range Forecast (MRF) 方案的一种改进形式, 湍流交换公式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[K_c \left(\frac{\partial C}{\partial t z} - \gamma_c \right) - \overline{(w'c')}_h \left(\frac{z}{h} \right)^3 \right], \quad (1)$$

其中, C 为诊断变量, 可以是风速、温度和水汽等; K_c 为湍流交换系数:

$$\gamma_c = b \frac{\overline{(w'c')}_0}{w_{s0} h}$$

局地梯度修正项, 其包含大尺度湍涡对总体通量的输送, 即非局地梯度引起的通量输送; $\overline{(w'c')}_0$ 是位温或水平风速的地面通量, w_{s0} 是边界层中部(0.5 h)的混合层速度尺度, $\overline{(w'c')}_h$ 是逆温层的通量; (1)式右端第二项表示混合层顶部夹卷过程对湍流输送的影响, 是 YSU 方案与 MRF 方案的主要区别。由于模式中将夹卷过程单独处理, 而不是作为边界层内部的混合过程, 从而增加了热力自由对流的湍流混合, 降低了动力强迫对流混合。

根据相似理论^[24] 分别计算近地层和混合层的湍流交换, 根据 Prandtl 数计算热量交换系数, 模式中考虑了交换系数随高度的变化。

将临界理查逊数为零的高度作为边界层顶, 使边界层顶唯一、有效地依赖于浮力廓线。

(2) MYJ 方案^[25]

MYJ 方案为 Mellor—Yamada 的 2.5 阶湍流闭合模型, 它可以预报湍流动能, 并有局地垂直混合。边界层控制方程组采用边界层近似, 2 阶矩方程中仅保留湍流动能方程, 即湍流动能方程的 1.5 阶闭合方案。根据 Kolmogorov 湍流理论给出交换系数, K_m 与湍流动能的平方根成正比。边界层高度定义为湍流强度下降到临界值 $0.001 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 的高度。近地层通量计算以 M—O 相似理论为基础, 采用 Beljaars^[26] 的修正形式, 在地面动能表达式中按一定比例增加了地面浮力通量, 即:

$$|U|^2 = u^2 + v^2 + (\beta w_*)^2,$$

从而使摩擦速度在自由对流和风速较小的情况都不为零。

表 1 不同边界参数化方案处理方法对比
Table 1 Comparison of different PBL parameterization schemes

方案	闭合方法	不稳定边界层混合过程	边界层顶部
YSU	非局地	K 廓线+反梯度项, 交换系数由相似理论计算	浮力廓线
MYJ	局地	由 TKE 诊断 K ; 由 Kolmogorov 的湍流理论计算交换系数	TKE 诊断
ACM	非局地+局地	向上混合过程为过渡湍流混合, 向下则为局地 K 混合, 根据相似理论和考虑风切变和局地理查逊数的湍涡交换公式分别计算交换系数, 取两者的大值	理查逊数

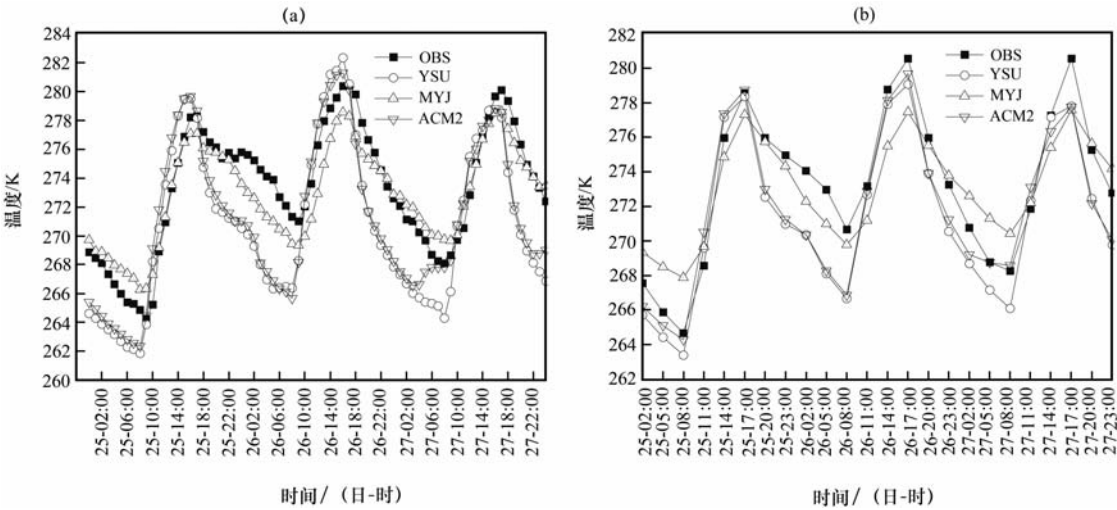


图 2 2005 年 1 月 25~28 日 3 种边界层方案(YSU、MYJ 和 ACM2)模拟的与观测的地面温度(2 m)日变化对比(单位: K)

(a)西固二水厂, (b)兰州站

Fig. 2 Comparisons of diurnal changes for surface temperature at height of 2 m observed and simulated by three PBL schemes (YSU, MYJ and ACM2) during 25~28 January 2005. Unit: K.

(a) at Second Water Supply Company in Xigu, (b) at Lanzhou station

由于 Mellor—Yamada 2.5 阶模型具有概念清晰、满足精度要求和节省计算时间等优点而得到广泛应用,但由于考虑的物理过程比较复杂,当不能满足其假设条件时,模拟结果有一定偏差。

(3) ACM2 方案^[27]

ACM2 是 ACM1 (Asymmetric Convective Model)的改进方案。ACM1 是由 Blackadar 对流模式^[28]改进而来,由浮力热泡作用引起向上的湍流输送,从模式最底层直接传递到其它层,而向下的湍流输送则由于补偿下沉作用而逐层传递。ACM2 在 ACM1 方案的向上输送过程中增加了局地输送部分,它可以模拟由浮力作用引起的气块向上输送,也可以模拟局地湍流交换。边界层内部的湍流交换速率分别采用相似理论和局地湍流交换公式计算,不稳定条件下的交换系数取两者的大值。采用理查逊数方法计算边界层高度,不稳定条件下的边界层高度考虑了夹卷层的热力穿透和风切变。

3 地面气象要素日变化模拟

为了检验不同 PBL 参数化方案对兰州地区地面气象场的模拟效果,更好地反映复杂下垫面不同地点的地面气象要素特征,利用 2005 年 1 月 25 日 00:00~28 日 00:00 期间兰州市地面自动站观测资料及西固二水厂的加强观测资料,将不同 PBL 参数化方案模拟结果进行了对比分析,以检验 WRF

模式中 YSU, MYJ 和 ACM2 3 种不同边界层参数化方案的模拟效果。

3.1 地面温度日变化

图 2a 和 b 是 WRF 不同边界层参数化方案模拟的西固二水厂和兰州市自动站的地面温度与观测资料的日变化对比图。由图中可以看出,虽然 3 种方案均模拟出了温度的日变化基本特征,但由于对湍流混合过程的处理不同,即使采用相同的陆面参数,地表湍流输送的差异使得 3 种边界层参数化方案模拟的地面温度存在差异,地面温度的模拟对边界层参数化方案较为敏感。由图 2 还可见,3 种边界层参数化方案模拟的白天地面温度与观测值比较接近,夜间则普遍偏低,偏差最大可达 4℃,模式给出的夜间辐射冷却效应偏强是其中原因之一。

不同参数化方案模拟的西固二水厂和兰州站的地面温度与观测值的误差统计分析表明(表 2),局

表 2 不同边界层参数化方案模拟的地面温度误差统计
Table 2 Error statistics of surface temperature simulated by different PBL parameterization schemes

地面温度	西固二水厂			兰州站		
	YSU	MYJ	ACM2	YSU	MYJ	ACM2
绝对误差	3.573	1.302	3.163	2.065	1.644	1.808
相对误差/%	1.3	0.5	1.2	0.756	0.602	0.661
均方根误差	4.015	1.557	3.649	2.4230	1.900	2.238

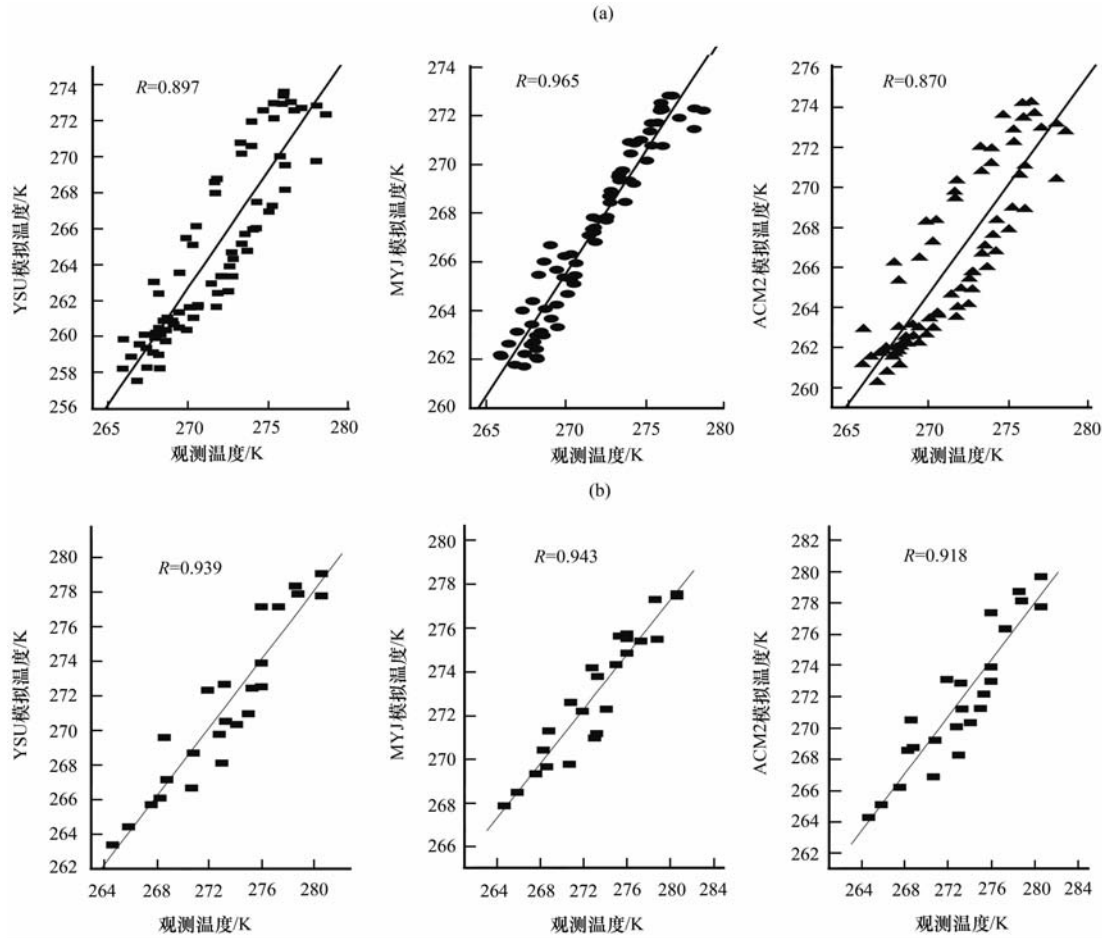


图 3 2005 年 1 月 25~28 日 3 种边界层方案(YSU、MYJ 和 ACM2)模拟的与观测的地面温度(2 m)散点分布(单位: K)
(a) 西固二水厂, (b) 兰州站
Fig. 3 Scatter plots of surface temperature(2 m) observed and simulated by three PBL schemes(YSU, MYJ and ACM2) during 25~28 January 2005. Unit: K (a) at Second Water Supply Company in Xigu, (b) at Lanzhou station

地闭合的 MYJ 方案模拟的地面温度均优于非局地闭合的 YSU 和 ACM2 方案, 主要原因是冬季边界层多处于稳定状态, 特别是受山谷地形影响, 逆温强, 近地层湍流没有充分发展, 物质和能量的输送以局地为主。

西固二水厂(图 3a)和兰州站(图 3b)模拟和观测的地面温度散点图表明, MYJ 方案在 2 个观测站的相关系数分别为 0.965 和 0.943, 均高于 YSU 和 ACM2 方案。

3.2 地面风速日变化

低空风速随高度的变化比较复杂, 不同边界层参数化方案模拟的地面风速与观测值的对比如图 4 所示。由图可见, 3 种边界层参数化方案, 地面风速的模拟值均大于观测值, 其中一个主要原因是模式没有考虑建筑物对风速的影响。相关分析表明,

ACM2 方案的模拟效果最好, MYJ 方案次之, YSU 方案最差。

4 气象要素垂直廓线模拟

4.1 位温廓线

从系留探空位温廓线可知, 02:00 大气处于稳定层结, 14:00 为近中性层结。

随着高度的增加, 不同边界层参数化方案模拟位温的差异逐渐减小, 到距地面约 2 km, 3 种参数化方案模拟的位温基本一致。图 5a 为 3 种边界层参数化方案模拟的 1 月 25~28 日 02:00 平均位温廓线, 可以看出, 3 种参数化方案模拟的夜间位温廓线分布基本一致, 位温随高度增加而增加; 与观测值比较可知, 在 400 m 以下各参数化方案的模拟值均高于观测值, 500 m 以上则反之。

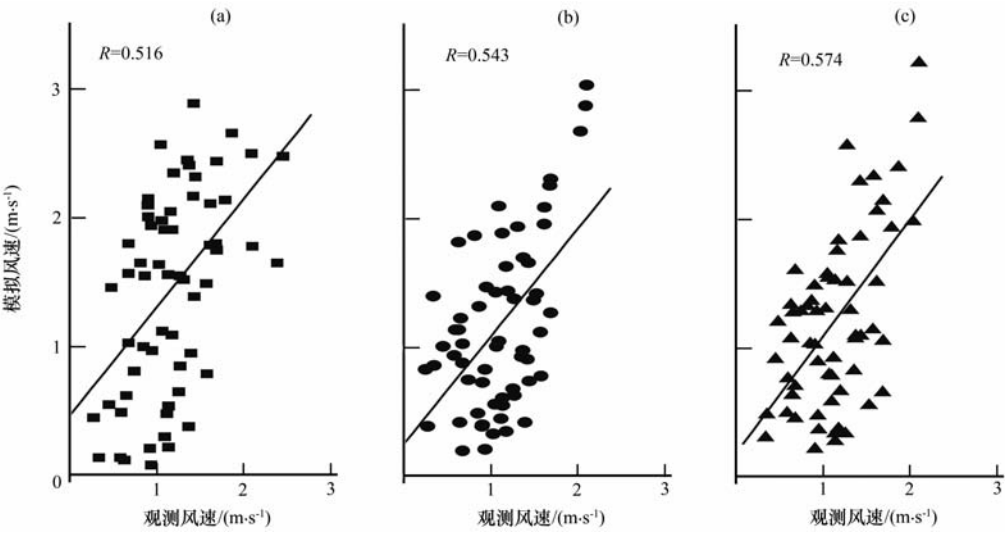


图 4 2005 年 1 月 25~28 日 3 种边界层方案((a) YSU、(b) MYJ 和(c) ACM2)模拟的与观测的地面风速(10 m)散点分布(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Scatter plots of surface wind speed (at 10 m) observed and simulated by (a) YSU, (b) MYJ and (c) ACM2 PBL schemes during 25~28 January 2005. Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

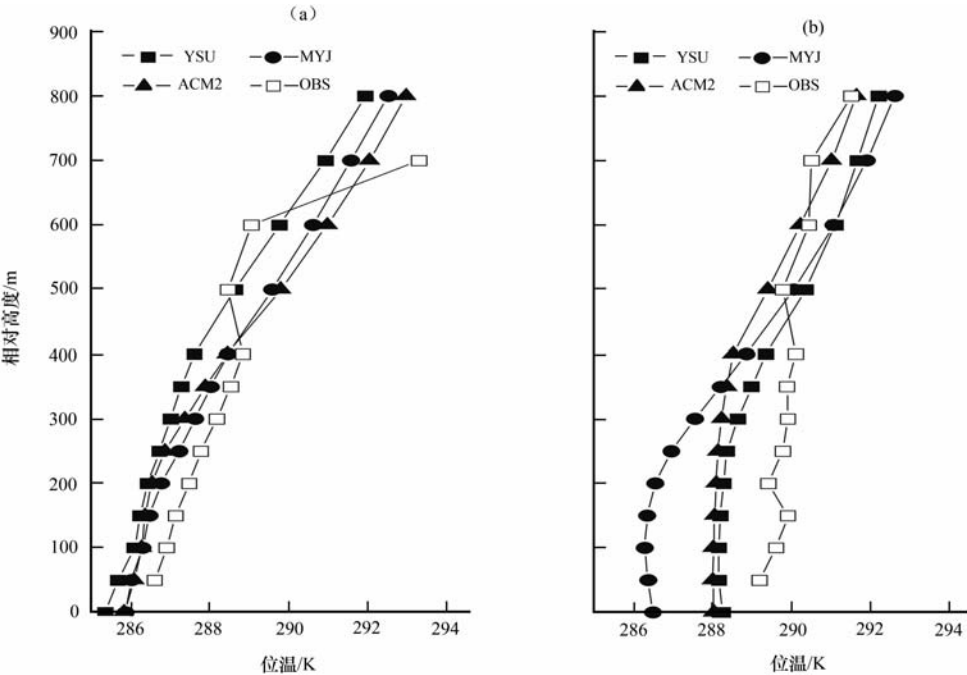


图 5 2005 年 1 月 25~28 日 3 种边界层方案(YSU、MYJ 和 ACM2)模拟的与观测的(a)02:00 和(b)14:00 平均位温垂直廓线(单位: K)

Fig. 5 Vertical profiles of average potential temperature observed and simulated by three PBL schemes (YSU, MYJ and ACM2) at (a) 02:00 and (b) 14:00 during 25~28 January 2005. Unit: K

图 5b 为 2005 年 1 月 25~28 日 14:00 平均位温的模拟与观测值比较。由图可见,在边界层低层(200 m 以下)和上部(400 m 以上)3 种参数化方案模拟的白天位温廓线形式比较一致,在 200~400 m 之间 YSU 和 ACM2 方案模拟的位温廓线比较接

近,呈近中性层结,而 MYJ 模拟的表现为稳定层结。主要原因是 3 种参数化方案对不稳定层结的湍流交换参数化差异大于稳定层结,不稳定层结下非局地闭合方案湍流交换较局地闭合方案的偏强。与观测值对比可知,在 400 m 以下各参数化方

表 3 不同边界层参数化方案模拟的各相对高度层位温的均方根误差统计

Talbe 3 Root Mean Square Error(RMSE) of the simulated potential temperature at different relative heights in three PBL schemes

高度/m	YSU	MYJ	ACM2
50	2.992	3.929	2.853
100	2.878	3.871	2.708
150	2.951	3.840	2.805
200	2.863	3.489	2.663
250	2.816	3.227	2.610
300	2.828	3.042	2.695
350	2.835	2.733	2.758
400	2.892	2.662	2.873
500	3.516	3.345	3.608
600	3.175	3.069	3.451
700	3.227	3.151	3.542

案模拟的位温低于观测值,400 m 以上则反之。从位温廓线形式来看,非局地闭合方案(YSU 和 ACM2)白天的模拟效果优于局地闭合方案(MYJ),主要原因是非局地方案考虑了由地面热通量引起的次网格湍流混合作用,加强了整层边界层湍流混合过程,使模拟位温分布更接近实测;而局地闭合的 MYJ 方案仅考虑模式垂直高度相邻层之间的湍流交换,湍流交换强度和速率较弱,模拟的垂直位温梯度大于非局地方案。

从 2005 年 1 月 25~28 日 3 种边界层参数化方案在距离地面的各个高度层位温模拟值与观测值的均方根误差统计来看(表 3),300 m 以下 ACM2 的均方根误差最小,300 m 以上 MYJ 的均方根误差最小。其可能的一个原因是 3 种参数化方案局地闭合或非局地闭合的差异,由于复杂地形、非均匀下垫面的影响,造成在低层大气机械湍流和热力湍流(特别是日间热力湍流)在水平和垂直方向差别较大,湍流交换较强,在此情形下,同时考虑局地闭合和非局地闭合的 ACM2 方案具有相对较强的描述低层大气湍流交换的能力;而在边界层上部,受地面影响较小,湍流交换随高度减弱,局地闭合方案可较好地描述大气湍流对温度的影响。

4.2 风廓线

由观测的风廓线可知,近地层风垂直分布呈现随机性特征,其主要受复杂地形、下垫面及湍流影响。同时,3 种边界层参数化方案模拟的风廓线差别较大,也反映了各参数化方案采用的闭合方法和对湍流交换处理方法的不同,导致模拟的风廓线存在差异。不同边界层参数化方案模拟的 2005 年 1 月 25~28 日 02:00 和 14:00 平均风廓线如图 6 所示。

由图 6a 可见,夜间非局地闭合方案(YSU 和 ACM2)模拟的风廓线形式相似,与观测的风向风速值都比较接近;400 m 以上,3 种方案模拟的风

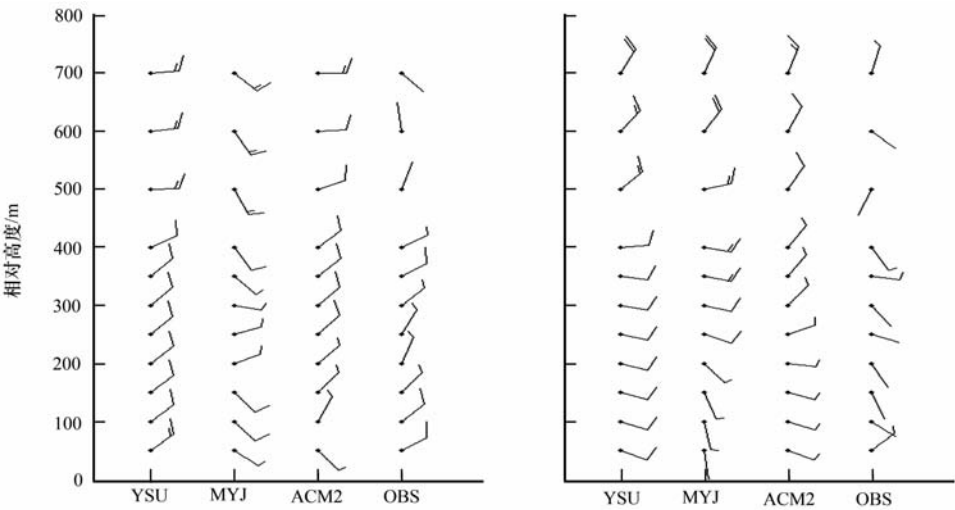


图 6 2005 年 1 月 25~28 日 3 种边界层方案(YSU、MYJ 和 ACM2)模拟的与观测的平均垂直风廓线(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 02:00, (b) 14:00

Fig. 6 Vertical profiles of average wind speed and wind direction observed and simulated by three PBL schemes (YSU, MYJ and ACM2) at (a) 02:00 and (b) 14:00 during 25~28 January 2005. Unit: K

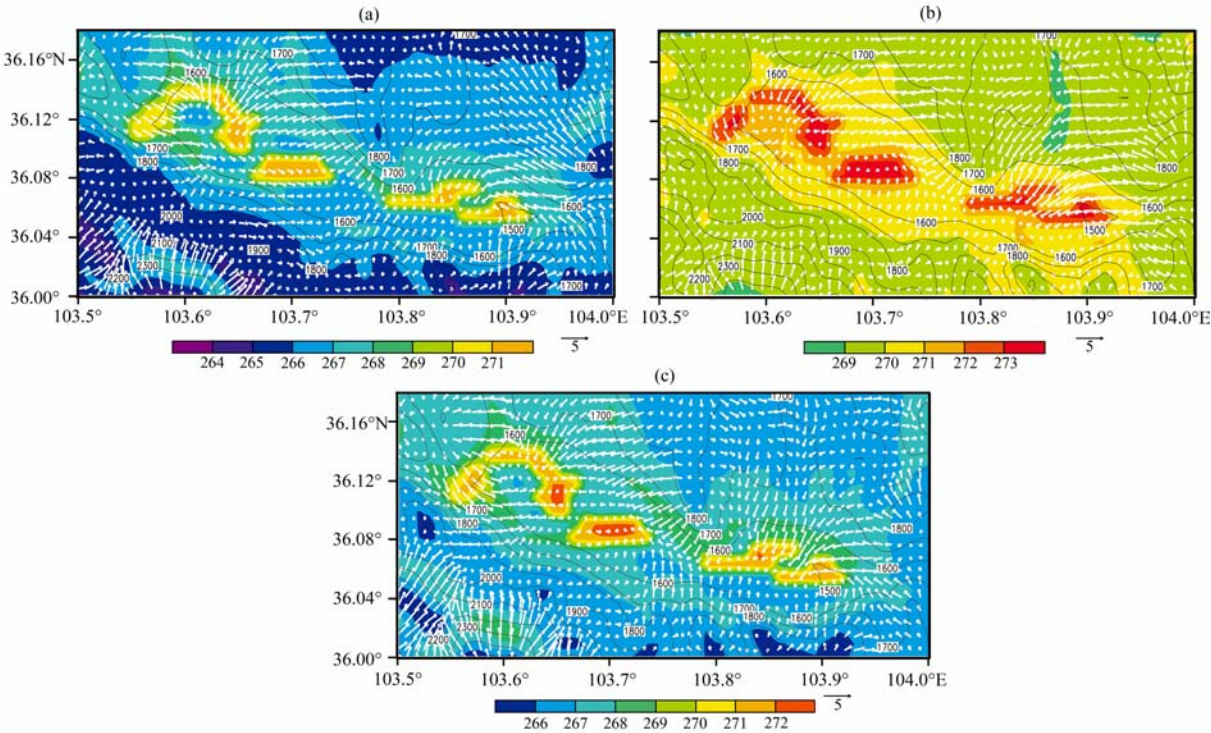


图 7 2005 年 1 月 25~28 日 02:00 3 种边界层参数化方案模拟的兰州地区平均的地面温度场 (阴影区, 单位: K) 和风场 (矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) YSU, (b) MYJ, (c) ACM2, 黑线为等高线 (单位: m)

Fig. 7 Horizontal distribution of average surface temperature (shading, unit: K) and wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 02:00 during 25~28 January 2005 simulated by YSU (a), MYJ (b) and ACM2 (c) PBL schemes. Solid line is contour (unit: m)

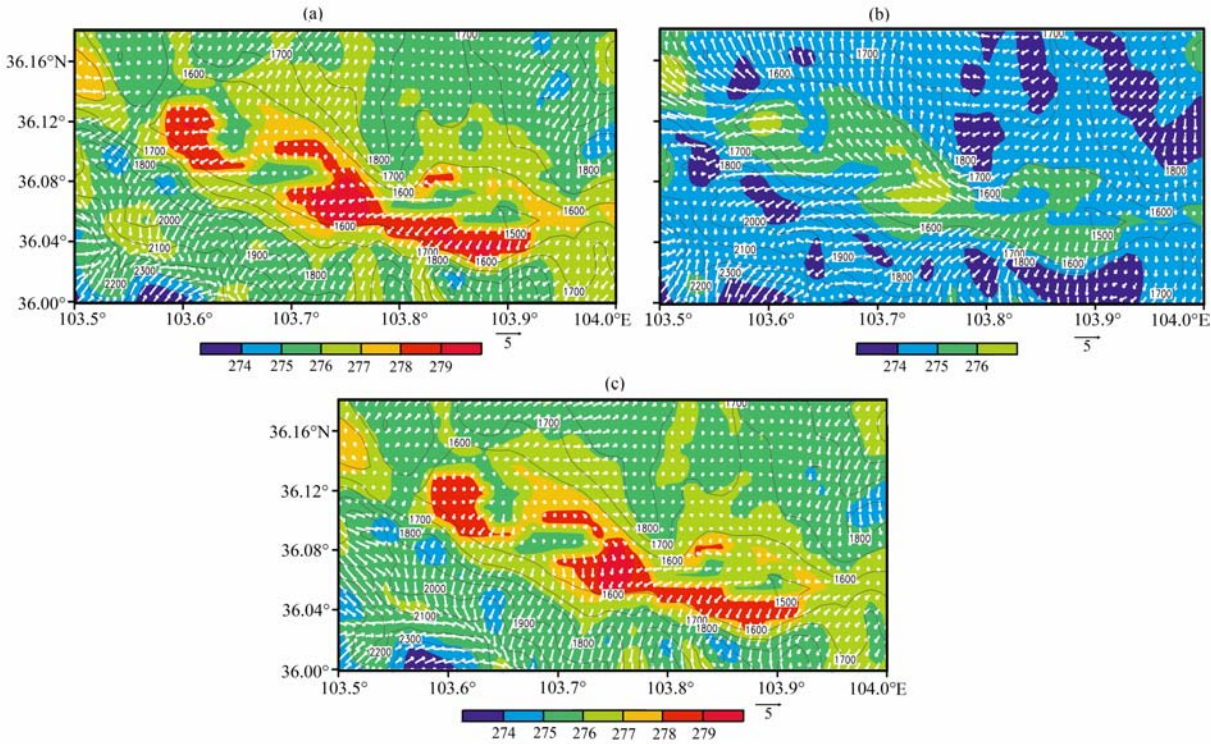


图 8 同图 7, 但为 14:00
Fig. 8 The same as the Fig. 7, but for 14:00

廓线差异较大,模拟的风速值大于观测值。

白天(图 6b),不同参数化方案模拟的风廓线在 500 m 以下差异较大,且与观测相比各参数化方案的模拟风速值偏高,风向偏差较大。

5 地面风场和温度场比较

图 7 和图 8 分别为 3 种边界层参数化方案模拟的 2005 年 1 月 25~28 日 02:00 和 14:00 地面温度场和风场分布。

3 种参数化方案模拟的温度场空间分布特征基本一致,兰州城区温度高于周边,表现出明显的城市热岛效应。各参数化方案模拟的夜间温度(图 7)在兰州西部盆地下坡气流辐合交汇处存在冷中心,白天温度(图 8)在兰州东、西部气流辐散处均存在冷中心。MYJ 方案采用局地闭合方法,与其它 2 种非局地闭合方案(ACM2 和 YSU)相比,湍流交换能力较弱,受地面影响不如其它 2 种非局地闭合方案强烈,地面大气在夜间降温幅度和白天增温幅度低于其它 2 种非局地闭合方案,导致 MYJ 方案模拟的夜间地面温度高于其它两个非局地闭合方案,白天则低于其它 2 种非局地闭合方案。3 种参数化方案模拟的地面温度场结果也表明,受太阳辐射影响,中午大气向不稳定层结发展,湍流混合加剧,因此温度场的分布表现更为均匀。

3 种参数化方案模拟的夜间和白天地面流场形势基本一致,河谷中心风速较小。02:00(见图 7),模拟的地面风场在兰州城区东、西部盆地各有一个辐合中心。其东部盆地辐合中心主要由东部进入城区的偏东气流和南北两山的下沉气流交汇形成,西部辐合中心则主要由西北气流和南北两山的下沉气流所致,南北两坡表现为弱的下坡风;14:00(见图 8),3 种边界层参数化方案模拟的兰州城区风场几乎为偏东气流所覆盖,南坡的爬坡气流明显强于北坡。

河谷山地复杂地形和下垫面特征导致兰州市区大气斜压性明显,温度场和风场复杂。夜间,受辐射冷却和城市热岛效应的影响,南北两山上空地面大气温度比较低,沿山坡下滑形成下坡风,在河谷盆地形成地面辐合流场;白天情况与夜间相反,受两侧山体及辐射影响,山坡增温比山谷快,地形作用形成的谷风环流加强了城区中心的下沉气流,但城市热岛效应对下沉气流有一定的抑制作用,从而使白天辐散流场较夜间的辐合流场弱。这些基本特征与以往有关观测和数值模拟研究给出的风场特征

一致^[29-34]。

6 结论

利用 WRF 模式不同边界层参数化方案 YSU、MYJ 和 ACM2,对兰州冬季边界层温度场和风场进行了模拟,讨论了不同参数化方案模拟复杂地形和下垫面条件下边界层气象场的能力,得到如下结论:

(1) 模式提供的 3 种边界层参数化方案都能较好地模拟兰州地区冬季典型风场特征。受河谷盆地影响,兰州市主导风向偏东;周围环山地形导致城市夜间地面流场多为辐合,城市热岛效应加强了山风环流;白天流场多为辐散,城市热岛效应对谷风环流有一定的抑制作用。

(2) 3 种边界层参数化方案模拟的兰州地区冬季温度场空间分布特征相似,但 MYJ 方案模拟的夜间温度低于 YSU 和 ACM2 方案,白天则高于 YSU 和 ACM2 方案。原因是局地闭合的 MYJ 方案湍流交换能力较弱,导致地面温度变化幅度低于非局地闭合方案。白天太阳短波辐射增强,湍流混合加剧的结果使得 3 种方案模拟的地面温度的水平梯度小于夜间。

(3) 不同边界层参数化方案对地面温度的模拟比较分析表明,对于冬季稳定边界层,局地闭合的 MYJ 方案可以更好地模拟低层温度时间变化特征。

(4) 与实测位温廓线对比可知,夜间 3 种边界层参数化方案模拟的位温廓线均较好,ACM2 方案模拟的白天低层位温廓线优于 MYJ 和 YSU 方案,而 MYJ 方案对边界层中上部位温廓线的模拟更接近于实测。

参考文献

- [1] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model[J]. Appl Meteor Climat, 2007, 46: 1396—1409.
- [2] Zhang K S, H T Mao, K Civerolo, et al. Numerical investigation of boundary-layer evolution and nocturnal low-level jets: Local versus non-local PBL schemes[J]. Environ Fluid Mechanics, 2001, 1: 171—208.
- [3] 王晨稀. MM5 模式中不同对流参数化方案对降水预报效果影响的对比试验[J]. 气象科学, 2004, 24(2): 168—176.
- [4] 蔡芎宁, 寿绍文, 钟青. 边界层参数化方案对暴雨数值模拟的影响[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 365—370.
- [5] Braun S A, W K Tao. Sensitivity of high-resolution simula-

- tions of Hurricane Bob (1991) to planetary boundary layer parameterizations[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 3941—3961.
- [6] Bright D R, S L Mullen. The sensitivity of the numerical simulation of the southwest monsoon boundary layer to the choice of PBL turbulence parameterization in MM5[J]. *Wea Forecasting*, 2002, 17: 99—114.
- [7] Srinivas C V, R Venkatesan, A Bagavath Singh. Sensitivity of mesoscale simulations of land-sea breeze to boundary layer turbulence parameterization[J]. *Atmos Environ*, 2007, 41: 2534—2548.
- [8] Wyser K, D Chen, H Ritchie. Impacts of boundary layer turbulence and land surface process parameterizations on simulated sea breeze characteristics[J]. *Ann Geophys*, 2009, 27: 2303—2320.
- [9] Carlos Péreza, Pedro Jiménez, Oriol Jorbaa, et al. Influence of the PBL scheme on high-resolution photochemical simulations in an urban coastal area over the Western Mediterranean [J]. *Atmos Environ*, 2006, 40: 5274—5297.
- [10] Miao J F, D Chen, K Wyser, et al. Evaluation of MM5 mesoscale model at local scale for air quality applications over the Swedish west coast: Influence of PBL and LSM parameterizations[J]. *Atmos Phys*, 2008, 99: 77—103.
- [11] Bossioli E, M Tombrou, A Dandou, et al. The role of planetary boundary-layer parameterizations in the air quality of an urban area with complex topography[J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 2009, 131: 53—72.
- [12] Zhang D L, W Z Zheng. Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations[J]. *Appl Meteor*, 2004, 43: 157—169.
- [13] Pleim J E. Combined Local and Non-local closure model for the atmospheric boundary layer. Part 2: Application and evaluation in a mesoscale Model[J]. *Appl Meteor Climatol*, 2007, 46: 1396—1409.
- [14] Zhang Y, M K Dubey, S C Olsen, et al. Comparisons of WRF/Chem simulations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the 2006—MILAGRO [J]. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 3777—3798.
- [15] Hu X M, J W Nielsen-Gammon, F Q Zhang. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. *J Appl Meteor & Climat*, doi: 10.1175/2010JAMC2432.1.
- [16] Miglietta M M, S Zecchetto, F De Biasio. WRF model and ASAR—retrieved 10 m wind field comparison in a case study over eastern Mediterranean Sea[J]. *Adv Sci Res*, 2010, 4: 83—88.
- [17] 陈炯, 王建捷. 北京地区夏季边界层结构日变化的高分辨率模拟对比[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(4): 403—411.
- [18] Zhang L, C H Chen, J Murlis. Study on winter air pollution control in Lanzhou, China[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2001, 127: 351—372.
- [19] 张强, 吕世华, 张广庶. 山谷城市大气边界层结构及输送能力[J]. *高原气象*, 2003, 22(4): 346—353.
- [20] 王式功, 杨德保, 李腊平, 等. 兰州城区冬半年冷锋活动及其对空气污染的影响[J]. *高原气象*, 1998, 17(2): 142—149.
- [21] 刘宇, 王式功, 尚可政. 兰州市低空风时空变化特征及其与空气污染的关系[J]. *高原气象*, 2002, 21(3): 322—326.
- [22] 尚可政, 达存莹, 付有智, 等. 兰州城区稳定能量及其与空气污染的关系[J]. *高原气象*, 2001, 20(1): 76—81.
- [23] Hong S Y, Y Noh, J Dudhia. A new vertical diffusion package with explicit treatment of entrainment processes[J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 2318—2341.
- [24] Brost R A, J C Wyngaard. A model study of the stably stratified boundary layer[J]. *J Atmos Sci*, 1978, 8: 1427—1440.
- [25] Mellor G L, T Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. *Rev Geophys*, 1982, 20: 851—875.
- [26] Beljaars Anton C M. The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 121: 255—270.
- [27] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing[J]. *Appl Meteor Climatol*, 2007, 46: 1383—1395.
- [28] Blackadar A K. Modeling pollutant transfer during daytime convection[C]. *Preprints, Fourth Symp on Atmospheric Turbulence, Diffusion, and Air Quality*, Reno, NV, Amer Meteor Soc, 1978: 443—447.
- [29] 邱崇践, 胡泽勇. 兰州附近地区地面风场的数值模拟实验[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1987, 23(2): 97—100.
- [30] 李江林, 陈玉春, 吕世华, 等. 利用 RAMS 模式对山谷城市冬季局地风场的数值模拟[J]. *高原气象*, 2009, 28(5): 1250—1259.
- [31] 缪国军, 张镭, 舒红, 等. 利用 WRF 对冬季大气边界层的数值模拟[J]. *气象科学*, 2007, 27(2): 169—175.
- [32] 王海龙, 张镭, 陈长和, 等. 兰州市东部地区冬季低空风场和温度场分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(4): 117—123.
- [33] 安兴琴, 陈玉春, 吕世华. 中尺度模式对冬季兰州市低空风场和温度场的数值模拟[J]. *高原气象*, 2002, 21(2): 186—192.
- [34] 李江林, 陈玉春, 吕世华. 利用 RAMS 模式对山谷城市兰州冬季湖泊效应的数值模拟[J]. *高原气象*, 2009, 28(5): 955—965.

Verification of WRF Simulation Capacity on PBL Characteristic
and Analysis of Surface Meteorological Characteristic
over Complex Terrain

WANG Ying, ZHANG Lei, HU Ju, ZHANG Yan

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education/College of Atmospheric Sciences,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Three planetary boundary layer (PBL) parameterizations(YSU, MYJ and ACM2) in WRF model are used to simulate surface temperature and wind in Lanzhou during 25~28 January 2005. Comparing with the simulations and the data from captive balloon sounding and Auto Weather Station, the results shows that: (1) Local MYJ scheme presents more reasonable diurnal changes of surface temperature than the other unlocal schemes (YSU and ACM2). (2) As to the simulation of potential temperature profiles, the results at the nighttime are better than that in the daytime. In the low-layer PBL, the potential temperature profiles from local and unlocal ACM2 schemes give better agreement with the observation; while in the upper PBL, local MYJ scheme is more suitable for the simulation of vertical profiles for potential temperature. (4) The spatial distributions of temperature over Lanzhou in winter from three PBL parameterization schemes are similar, while the temperature at the nighttime from MYJ scheme is higher than that from YSU and ACM2 schemes, but opposite in the daytime.

Key words: Lanzhou; WRF; PBL parameterization; Temperature field; Wind field; Complex terrain